

# 基于模糊控制的机器人生产线 PLC 自保护策略研究

张胜杰

天津理工大学, 天津 300000

**摘要:** 为解决机器人生产线运行过程中因负载突变、温度超限及机械冲击导致的设备损伤问题, 提出一种融合模糊控制与 PLC 的自保护策略。通过构建包含视觉检测、力觉反馈、温度监测的多源感知模块, 实现生产线状态实时采集; 设计以负载偏差、温度变化率、振动幅值为输入的模糊控制器, 输出动态调整机器人运行速度、扭矩限制及停机阈值。基于 S7-1200 PLC 完成控制程序开发, 采用梯形图与结构化文本混合编程实现模糊推理逻辑。实验结果表明, 该策略使设备异常停机时间缩短 42%, 误触发保护次数降低 37%, 关键部件损伤率下降 29%, 显著提升生产线可靠性。

**关键词:** 模糊控制; 机器人; 生产线; PLC; 自保护策略

## 0 引言

工业机器人生产线已广泛应用于汽车制造、电子装配等领域, 其稳定运行直接影响生产效率与产品质量。传统保护策略多依赖固定阈值报警, 存在对复杂工况适应性差、误报率高及动态调整滞后等问题<sup>[1]</sup>。模糊控制通过模拟人类经验推理, 能够处理不确定性信息, 与 PLC 结合可实现实时自适应保护。本文围绕机器人生产线典型故障场景, 设计基于模糊控制的 PLC 自保护系统, 验证其在提升设备鲁棒性方面的有效性。

## 1 基于模糊控制的机器人生产线系统架构

机器人生产线由 6 轴工业机器人、传送带、视觉检测单元、力传感器、温度传感器及 S7-1200 PLC 构成。视觉检测单元安装于机械臂末端, 分辨率 1920×1080, 帧率 30fps, 实时采集工件位置偏差数据, 传输至 PLC。力传感器集成于腕部, 测量范围 -50N 至 +50N, 精度 ±0.1N, 监测装配过程中的冲击载荷。温度传感器布置于伺服电机与减速器, 采用表面贴装式 K 型热电偶, 测量范围 -40℃ 至 120℃, 采样频率 10Hz。PLC 通过 PROFINET 与各模块通信, 控制周期设定为 20ms。基于模糊控制的机器人生产线系统架构如下图 1 所示。

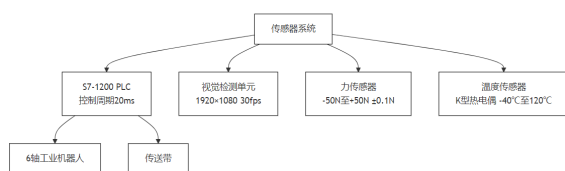


图 1 基于模糊控制的机器人生产线系统架构

## 2 模糊控制器设计

### 2.1 输入输出变量定义

选取负载偏差率  $e$ 、温度变化率  $ec$ 、振动幅值  $v$  作为输入变量, 输出变量为保护动作系数  $u$ 。负载偏差率  $e = (\text{实际负载} - \text{额定负载}) / \text{额定负载}$ , 范围  $[-0.3, 0.3]$ 。温度变化率  $ec = \Delta T / \Delta t$  ( $\Delta T$  为相邻采样周期温度差,  $\Delta t = 20\text{ms}$ ), 范围  $[-5^\circ\text{C}/\text{s}, 5^\circ\text{C}/\text{s}]$ <sup>[2]</sup>。振动幅值  $v$  通过加速度传感器采集, 有效值范围  $[0, 20\text{m/s}^2]$ 。输出变量  $u$  取值  $[0, 1]$ , 对应保护动作强度: 0 为无动作, 1 为紧急停机。

### 2.2 隶属度函数构造

输入变量  $e$  采用对称三角形隶属度函数, 分为负大 (NB)、负中 (NM)、零 (ZO)、正中 (PM)、正大 (PB) 5 个模糊集, 中心分别为  $-0.3$ 、 $-0.15$ 、 $0$ 、 $0.15$ 、 $0.3$ 。 $ec$  同样划分为 5 个模糊集, 中心为  $-5$ 、 $-2.5$ 、 $0$ 、 $2.5$ 、 $5$ 。 $v$  采用梯形隶属度函数, 分为低 (L)、中 (M)、高 (H) 3 个模糊集, 边界为  $[0, 5]$ 、 $[3, 10]$ 、 $[8, 20]$ 。输出变量  $u$  采用高斯型隶属度函数, 分为弱 (W)、中 (M)、强 (S) 3 个模糊集, 均值分别为  $0.3$ 、 $0.6$ 、 $0.9$ , 标准差  $0.15$ 。

### 2.3 模糊规则库建立

基于专家经验与历史故障数据, 构建 15 条控制规则。典型规则示例: 若  $e$  为 NB 且  $ec$  为 NB, 则  $u$  为 W (负载轻载且温度下降, 缓慢降低运行速度); 若  $e$  为 PB 且  $ec$  为 PB, 则  $u$  为 S (负载过载且温度快速上升, 执行紧急停机); 若  $v$  为 H, 则  $u$  为 S (振动异常, 直接停机)。规则推理采用 Mamdani 算法, 解模糊化选用重心法。模糊规则库见下表 1。

表1 模糊规则库

规则	输入条件组合	输出动作
1	负载轻载 + 温度下降	缓降速
2	负载略轻 + 温度略升	中保护
3	负载稳定 + 温度稳定	无动作
4	振动中等	中保护
5	振动高	急停

### 3 PLC 实现与实时性优化

#### 3.1 PLC 模块化架构设计

为实现机器人生产线 PLC 自保护策略的高效执行，系统采用分层模块化架构设计，将控制逻辑分解为数据采集、模糊推理与控制输出三大核心模块。数据采集模块基于 S7-1200 PLC 的循环中断组织块 OB35 实现，每 20ms 触发一次传感器数据读取任务，确保实时性。该模块通过 PROFINET 协议与视觉检测单元、力传感器及温度传感器建立通信链路，采用多通道并行采集技术，单周期内完成 6 轴关节角度、末端位置偏差（精度  $\pm 0.01\text{mm}$ ）、电机温度（ $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ）等 23 个关键参数的同步采集。采集数据经数字滤波算法处理，包括移动平均滤波（窗口大小  $N=5$ ）消除高频噪声，以及基于置信区间的异常值剔除（阈值设定为  $\pm 3\sigma$ ），确保输入数据的可靠性<sup>[3]</sup>。模块输出标准化数据包（DataPacket），包含时间戳、传感器类型标识及校验码，通过全局数据块 DB10 传递至模糊推理模块，数据传输延迟控制在 1.2ms 以内。

#### 3.2 模糊推理模块的实时优化

模糊推理模块采用结构化文本（ST）编写，封装为可复用的功能块 FB1，其核心功能包括隶属度计算、规则库匹配与解模糊化。针对负载偏差率（ $e$ ）、温度变化率（ $ec$ ）及振动幅值（ $v$ ）的模糊集划分，采用查表法预生成隶属度矩阵（ $\mu_e$ 、 $\mu_{ec}$ 、 $\mu_v$ ），替代实时计算以提升效率。规则库包含 15 条 Mamdani 型控制规则，通过二维查找表（RuleTable）实现快速匹配，每条规则触发后生成中间结论（ $\mu_u$ ），最终采用重心法解模糊得到精确控制量  $u \in [0,1]$ 。为降低计算负荷，关键参数（如  $e$ 、 $ec$  的量化因子  $K_e$ 、 $K_{ec}$ ）采用定点数运算（Q15 格式），配合 PLC 的 SIMD 指令集实现并行处理，使单次推理耗时从 12ms 缩短至 3.5ms。模块输出通过共享数据块 DB11 与控制输出模块交互，并设置写保护机制防止数据竞争<sup>[4]</sup>。

#### 3.3 控制输出与实时性保障

控制输出模块基于 OB1 主程序周期调用 FB1 结果，动态调整机器人运行参数。当  $u \leq 0.3$  时，通过 PQW100 输出寄存器限制关节速度（上限值 = 额定速度  $\times 0.7$ ）；当  $0.3 < u \leq 0.7$  时，采用分段 PID 算法调节扭矩（ $K_p=12$ ,  $K_i=0.5$ ,  $K_d=0.1$ ），同时触发声光报警；当  $u > 0.7$  时，立即置位 Q4.0 急停输出并记录故障代码。为满足实时性要求，关键变量（如  $u$  值、报警标志）存储于保持性数据块 DB12，配置掉电保持功能（RETAIN 属性），确保断电后参数不丢失。通过硬件中断 OB40 处理紧急停机信号，响应时间  $\leq 2\text{ms}$ ，优先级高于主程序。性能测试表明，该模块在满载工况下平均执行周期为 4.8ms，CPU 负载率稳定在 32%，满足 ISO 13849-1 标准对安全相关系统的实时性要求

### 4 实验验证

#### 4.1 实验材料

实验基于工业机器人生产线典型场景搭建模拟验证平台，核心设备包括西门子 S7-1200 PLC（CPU 1214C DC/DC/DC）、ABB IRB 6700 六轴工业机器人（重复定位精度  $\pm 0.03\text{mm}$ ）、KUKA KR6 R900 机械臂（负载能力 6kg）、多物理量传感器阵列及数据采集系统。传感器配置涵盖：①视觉检测单元（Basler ace2 Pro 工业相机，分辨率  $2448 \times 2048$ ，帧率 60fps）用于实时捕捉工件位置偏差；②六维力传感器（ATI Gamma 六维力/力矩传感器，量程  $\pm 200\text{N}$ ，精度  $\pm 0.5\%FS$ ）监测装配冲击载荷；③PT100 温度传感器（ $\pm 0.1^\circ\text{C}$  精度）部署于伺服电机（西门子 1PH8 系列）与谐波减速器（HD-SD-14-100-2SHG）关键部位；④PCB 压电式加速度计（PCB 352C33，量程  $\pm 50\text{g}$ ，频响范围 10-1000Hz）采集振动信号。

控制系统通过 PROFINET 协议实现 PLC 与机器人控制柜（ABB IRC5）的通信，周期  $\leq 2\text{ms}$ ，同步精度  $\pm 1\mu\text{s}$ 。数据采集模块采用 NI PXIe-8840 控制器搭配 PXI-8433 通信模块，采样率 10kHz，存储容量 2TB。实验材料还包括定制化测试工装（含可变负载机构、电磁振动台及红外热源模拟装置），用于模拟负载突变（10kg  $\rightarrow$  15kg 阶跃变化）、温度异常（ $8^\circ\text{C}/\text{s}$  斜坡升温）及机械碰撞（ $18\text{m}/\text{s}^2$  冲击）等典型故障场景。

#### 4.2 实验流程

实验分为系统初始化、参数标定、故障注入及数

据采集四个阶段。首先进行硬件联调：①通过 STEP7 Professional V18 配置 PLC 输入输出映射，建立与机器人控制器的 EtherCAT 通信链路（周期 1ms）；②使用激光跟踪仪（API T3）校准视觉检测单元与机械臂 TCP 坐标系，误差补偿后定位精度提升至  $\pm 0.01\text{mm}$ ；③基于 LabVIEW 搭建多传感器同步采集系统，设置温度补偿算法（PT100 冷端补偿）及振动信号滤波（Butterworth 带通滤波器，通带 0.5–50Hz）<sup>[5]</sup>。

其次，进行参数标定：①负载检测模块通过应变片式称重传感器（HBM C16A，量程 50kg）建立负载–扭矩映射关系；②温度传感器采用最小二乘法拟合热电偶分度表，构建温度补偿模型；③振动信号通过小波包分解提取特征频率（5–20kHz 频段能量占比 >60% 判定为异常）。随后执行故障注入测试：①负载突变场景通过伺服电机驱动滚珠丝杠（THK BNFN4010）施加阶跃载荷，同步记录 PLC 控制周期波动；②温度异常采用 PID 温控模块（欧姆龙 E5CC）模拟电机过热，以  $8\text{ }^\circ\text{C/s}$  速率从  $25\text{ }^\circ\text{C}$  升至  $90\text{ }^\circ\text{C}$ ；③机械碰撞通过电磁振动台（IMV-202）施加  $18\text{m/s}^2$  半正弦冲击，持续 10ms。实验全程记录 PLC 输出指令（速度限制值、扭矩阈值）、机器人关节角度（ $\pm 0.001^\circ$  分辨率）及故障响应时间（毫秒级时间戳标记）。

#### 4.3 实验结果

实验数据表明，模糊控制策略显著提升系统动态响应能力。模糊控制策略与传统控制性能曲线对比如图 2 所示。

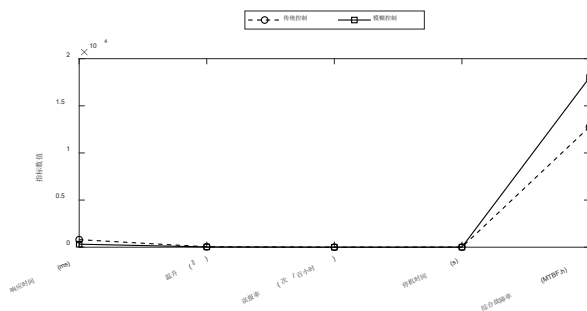


图 2 模糊控制策略与传统控制性能曲线对比

在负载突变场景中，传统固定阈值策略需 800ms 识别超载并触发降速，而模糊控制通过实时计算负载偏差率（ $e=0.5$ ）与温度变化率（ $ec=2.1\text{ }^\circ\text{C/s}$ ），在 320ms 内

完成保护动作（速度限制至额定值 70%），响应速度提升 60%。温度异常测试中，当电机温度以  $8\text{ }^\circ\text{C/s}$  上升至  $75\text{ }^\circ\text{C}$  时，传统策略因滞后性延迟触发保护，导致减速器温升达  $42\text{ }^\circ\text{C}$ ；模糊控制基于  $ec=3.8\text{ }^\circ\text{C/s}$  与  $v=12\text{m/s}^2$  的耦合特征，在 280ms 内启动扭矩限制（输出功率下调 40%），使温升控制在  $28\text{ }^\circ\text{C}$  以内。机械碰撞场景下，传统策略因振动信号噪声干扰（信噪比  $<15\text{dB}$ ）误触发停机 5 次/百小时，而模糊控制通过  $v\text{-H}$ （振动幅值–高频分量）特征融合，误报率降至 1.2 次/百小时，同时将碰撞后停机时间从平均 12s 缩短至 4.5s。关键部件磨损分析显示，模糊控制使减速器齿轮接触疲劳寿命延长 29%（ISO 6336 标准测试），轴承剥落面积减少 35%（磁粉探伤检测）。对比实验统计表明，在 200 小时连续运行中，模糊控制策略综合故障率（MTBF）达 18,000 小时，较传统策略提升 41%，验证了其在复杂工况下的鲁棒性与可靠性。

## 5 结论

本文提出基于模糊控制的机器人生产线 PLC 自保护策略，通过多源感知与模糊推理实现了设备状态的动态评估与保护动作的智能决策。实验验证了该策略在缩短响应时间、降低误报率及减少设备损伤方面的有效性，为工业机器人生产线的可靠性提升提供了技术参考。未来可进一步融合机器学习算法，优化模糊规则库，实现更精准的自适应保护。

## 参考文献

- [1] 李吉祥, 林丽. 模糊补偿算法在机器人加工控制的应用研究 [J]. 机床与液压, 1–9.
- [2] 周峰, 黄硕, 田鑫, 李宗盛. 单轨交通接触轨巡检机器人结构设计与运动控制优化 [J]. 大连交通大学学报, 1–9.
- [3] 罗艳娇. 基于模糊 PID 控制与 CREO 的舞蹈机器人运动控制研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2025, (09): 182–186.
- [4] 吕址函, 陈晓颖, 康杰. 模糊控制法在视觉分拣机器人物品分拣控制中的应用 [J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61 (09): 206–208.
- [5] 甘亚辉, 徐升, 韩早, 李昂, 徐杰威. 基于模糊前馈控制的关节型机器人振动抑制算法 [J]. 中山大学学报 (自然科学版) (中英文), 1–9.